

彗星中尘埃的带电特性和平衡电势的研究^{*}

陈耀 李中元 李嘉巍 段素平

(中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026)

摘要

分析了彗星中尘埃粒子的带电特性,以及计算了彗星尘埃等离子体的典型参数.对 Halley 彗星和 G-Z 彗星进行了讨论,得出了彗星中尘埃平衡电势的一些主要规律.一般来说,这些规律也可以适用于其他等离子体彗星.

关键词 空间等离子体; 彗星尘埃; 充电; 平衡电势

彗星中主要的成分是水 and 尘埃.当彗星跨过火星轨道,接近太阳时,其彗核周围形成了电离层.彗星大气主要是由水和氢构成的等离子体环境.太阳系中有许多天体和研究对象是尘埃等离子体,彗星是比较典型的一种.根据一般尘埃等离子体的知识,沉浸在等离子体环境中的尘埃粒子,受到等离子体的冲击和电子发射等原因,应该被充电.带电尘埃可以响应空间电磁场的作用,以及可以作为一种新的组分参加到彗星等离子体的集体行为之中.考虑了彗星尘埃等离子体的作用,许多现象可以得到解释,一系列新的特性被揭示出来.

彗星中尘埃的充电机制,首先是等离子体带电粒子的入射电流,在尘埃粒子表面产生的附着沉浸,其充电电流为^[1] $J_1 = J_0(1 - K_{RP})$,在这里 $J_0 = a^2 q n (8\pi T/m)^{1/2} \exp(-qU/T)$;其中的 a 、 U 分别表示尘埃半径和表面电势, K_{RP} 是等离子体粒子被反射、或者穿透尘埃的概率.尘埃在太阳光的辐照下会产生光致电离,其光子电流为^[1] $J_2 = \pi a^2 \eta D^{-2} B(U, T_2)$, η 为1AU处总的光电子的产生率, D 为日心距离, T_2 是光电子的温度.在这里 $B(U, T_X)$ 为返回到带电尘埃的电子,当 $U > 0$, $B(U, T_X) = (1 + U/T_X) \exp(-U/T_X)$;当 $U < 0$, $B(U, T_X) = 1$.再则,如果入射电子能量较大,还会在尘埃表面引发二次电子,二次发射的电流为^[2] $J_3 = 3.70 \delta_m J_1 F_s(0.25 E_m/T) B(U, T_3)$,这里的 T_3 为二次电子温度, δ_m 是极大

电子的产生率, E_m 是与 δ_m 相对应的电子的能量,而 $F_s(x) = x^2 \int_0^\infty t^5 \exp(-xt^4 - t) dt$.

还有其他的充电电流和机制(例如热发射、场致辐射等),但其作用都比较小,可以不必考虑.当到达某个阶段,尘埃等离子体会达到平衡状态,亦即 $\sum J_\alpha = 0$, $\alpha = 1, 2, 3$.

考虑以上3种主要的充电过程(J_1 , J_2 和 J_3),以及考虑彗星是 H_2O^+ 的等离子体环境,彗星尘埃的主要成分为C(碳尘埃)和Si(硅尘埃).根据飞船对 Halley 彗星和 G-Z 彗星的某些实测资料,我们可以来分析彗星尘埃等离子体的特性.图1和图2是飞船对彗星的观测结果^[3],在下面的数值计算中,我们应用到了这些测量的数据.对彗星中两类主要的尘埃物质(C和Si),我们计算了它们的带电特性和平衡电势,用数值方法解充电电流方程

^{*} 国家自然科学基金项目(10173010, 49834040),中国科学院知识创新工程方向性项目共同资助

2003-02-25 收到原稿, 2003-06-05 收到修定稿

$\sum J_\alpha = 0$. 计算中, 使用了如下的彗星中尘埃物质的典型参数^[4]: $\delta_m = 2.4$ (对 Si), 1.0(对 C); E_m (eV) = 400 (对 Si), 250(对 C); η ($e|\mu\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) = 125(对 Si), 60(对 C); $K_{\text{RP}} = 0.02$ (对 C 和 Si).

通过数值计算, 我们得到了彗星中尘埃等离子体的某些参数. 图 3 是计算得到的平衡

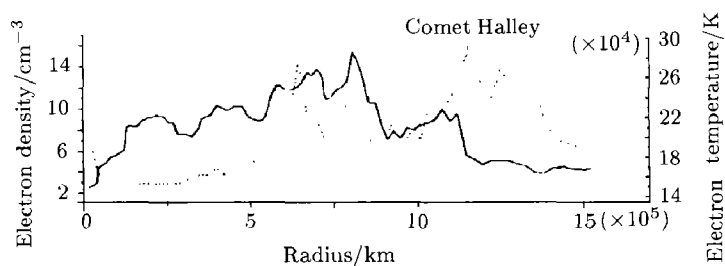


图 1 Halley 彗星的电子密度 n_e (实线) 和电子温度 T_e (虚线) 随 R (离开彗核的距离) 的变化曲线
Fig.1 Electron density $n = n_e$ (solid line) and temperature $T = T_e$ (dashed line) at different distance R from P/Halley

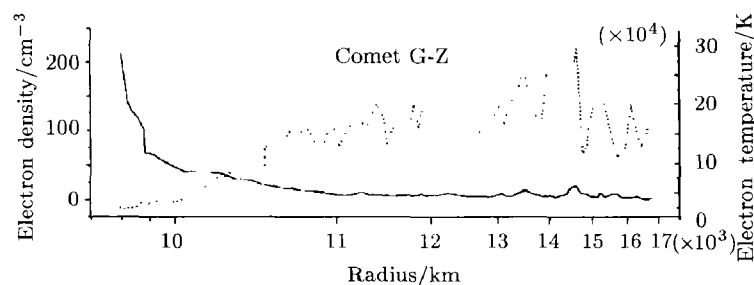


图 2 G-Z 彗星的电子密度 n_e (实线) 和电子温度 T_e (虚线) 随 R (离开彗核的距离) 的变化曲线
Fig.2 Electron density $n = n_e$ (solid line) and temperature $T = T_e$ (dashed line) at different distance R from P/G-Z

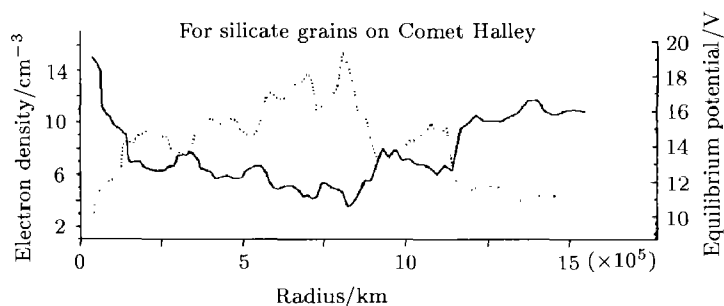


图 3 Halley 彗星中平衡电势 (实线) 和电子密度 (虚线) 随着 R 的变化特性曲线
Fig.3 Equilibrium potential of silicate materials (solid line) in Comet Halley and the electron density (dashed line) at different distance R from P/Halley

电势随着 R (离开彗核的距离) 的变化关系曲线 (实线), 以及相应的电子密度 n_e 的变化曲线 (虚线). 图 3 中的曲线是以 Si 尘埃作为算例来数值分析的, 由图 3 可知, 平衡电势的变化规律与电子密度的变化规律具有明显的相关特性.

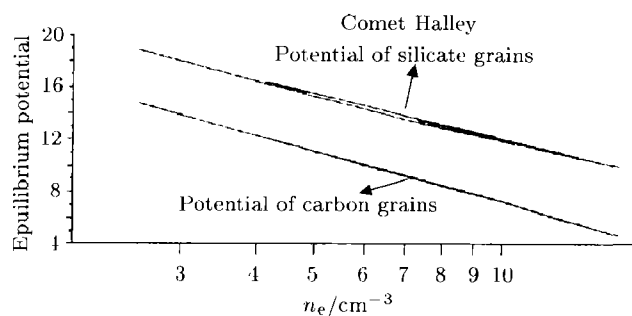


图 4 Halley 彗星中尘埃平衡电势和电子密度对数的相关曲线

Fig.4 The relationship between the potential and the logarithm of the electron density for Comet Halley

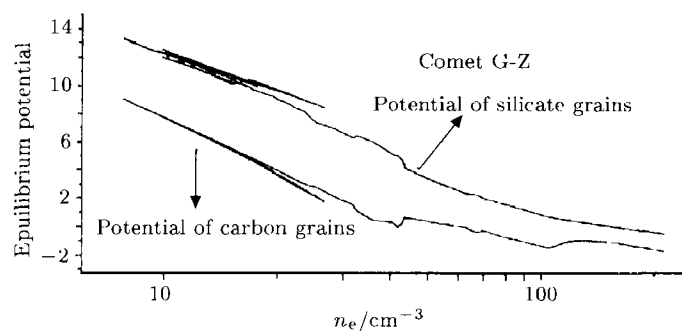


图 5 G-Z 彗星中尘埃平衡电势和电子密度对数的相关曲线

Fig.5 The relationship between potential and the logarithm of electron density for Comet G-Z

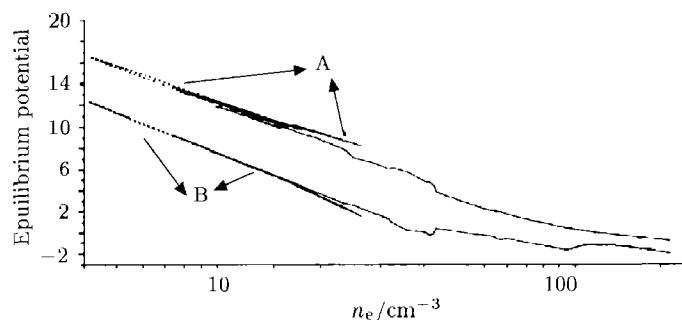


图 6 $U(V) - \lg n_e$ 的对应曲线 (虚线: Halley 彗星, 实线: G-Z 彗星, A:Si 尘埃, B:C 尘埃)

Fig.6 Put the lines together into two ones. Dashed lines: Comet Halley, Solid lines: Comet G-Z, Line A: Silicate grains, Line B: Carbon grains

我们可以建立起平衡电势和电子密度之间的函数关系. 图 4 和图 5 分别表示 Halley 彗星和 G-Z 彗星中“平衡电势”和“电子密度的对数”之间的相关曲线. 两张图中, 位于上面的曲线, 对应于 Si 尘埃的特征; 位于下面的曲线, 是对应于 C 尘埃的特征. 由于飞船经过 Halley 彗星和 G-Z 彗星的远近距离不一样, 所以计算的位置 R 也就有许多不同; 但考虑到 Halley 彗星和 G-Z 彗星的尘埃等离子体环境是基本上相似的, 所以我们可以综合考虑图 4 和图 5, 把它们放在一起, 连接起来, 由此便可以得到图 6 的二条相关曲线 (A 和 B). 图 6 中, 虚线由 Halley 彗星求得, 实线由 G-Z 彗星求得; 曲线 A 对应于硅 (Si) 尘埃, 曲线 B 对应于碳 (C) 尘埃. 曲线 A 和 B 分别可以用以下的拟合代数方程来表示之:

$$U(V) = A_1 + A_2 \lg n_e, \quad U(V) = B_1 + B_2 \lg n_e.$$

根据图 6 的曲线, 可得 $A_1 = 23.26$, $A_2 = -11.12$, $B_1 = 19.69$, $B_2 = -12.03$. 曲线 A (Si 尘埃) 和曲线 B (C 尘埃), 几乎是具有相互平行的特征.

由以上的计算结果可知, 不同种类的尘埃粒子, 在同样的彗星等离子体环境中, 平衡电势是不一样的. 从图 6 中可以看出, C 尘埃与 Si 尘埃相比, 平衡电势要低. 由于尘埃粒子的成分、大小、质量等因素不一样, 导致平衡电势不一样, 这是能够理解的, 也是显然的. 数值解又告诉我们, 平衡电势与电子密度的关系非常密切. 我们计算的彗星环境, 电子密度不算太高 ($0-100/\text{cm}^3$), 电子温度大约在 10^5K 左右; 这种环境, 对一般的等离子体彗星大多是适合的^[5]. 所以, 同我们计算的等离子体彗星环境, 在其相差不是太大的情况下, 文章中的数值解都是可以用的; 一般得到了电子密度, 就大致可以知道尘埃平衡电势的量级. 计算中还发现, 平衡电势和电子温度的关系不像电子密度那样密切; 平衡电势与彗星中等离子体的成分的关系也不大.

参 考 文 献

- [1] Whipple E C. Potentials of surfaces in space. *Rep. Prog. Phys.*, 1981, **44**:1 197—1 250
- [2] Shi Zhidong, Li Zhongyuan. Disruption of charged dust grains in cometary environments. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**: 155—160
- [3] Balsiger H *et al.* Ion composition and dynamics at comet Halley. *Nature*, 1986, **321**:330—334
- [4] Shi Zhidong, Li Zhongyuan. Charging of dust grains in cometary plasmas. In: *Proceeding of the International Workshop on Observatory of Our Planetary System*. Nanjing: Purple Mountain Observatory, 1998, **17**:90—94
- [5] Li Zhongyuan. A research in the space dust dynamics. *Prog. Astron.*, 2001, **19**(2):161—166. in Chinese (李中元. 空间尘埃动力学的研究方向. *天文学进展*, 2001, **19**(2):161—166)

STUDY ON THE CHARGING CHARACTERISTICS AND EQUILIBRIUM POTENTIAL OF DUST GRAINS IN COMETS

CHEN Yao LI Zhongyuan LI Jiawei DUAN Suping

(School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract

The comets are consisted mainly of water and dust and around cometary nuclear there are ionized gases mainly made up of water and hydrogen. Dust grains in comet will become charged. As a new composition, charged dust grains will take part in cometary plasma group behaviors.

Three main charging mechanisms are considered in this paper. First, charged plasma particles spray onto surfaces of dust grains will be collected, this current is presented by J_1 ; second, photoemission caused by the solar rays, the photoelectron current is J_2 ; third, J_3 , current of secondary electron eject. At a certain stage, dust grains will stop charging and attain an equilibrium-state, i.e., $\sum J_\alpha = 0$, $\alpha = 1, 2, 3$. Considering that comets are plasma environments of H_2O^+ , and the main compositions of cometary dust are silicate and carbon, based upon observational data of comet Halley and comet G-Z, the charging characteristics and equilibrium potentials of dust grains are calculated. A curve of equilibrium potential at different distance from the nuclear of P/Halley is provided. It is found that the equilibrium potential is obviously correlative with electron density. Using algebraic equations about equilibrium potential and logarithm of electron density, too, the calculations showed that the equilibrium potential has little relativity with other plasma parameters such as electron temperature. Generally, these conclusions can be suitable for other plasma comets.

Key words Comet, Space plasma, Cometary dust